

УДК 543.422.8

АППРОКСИМАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОСЛАБЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ 0,1-100 кэВ

А.Л.Финкельштейн, П.М.Фарков
Институт геохимии СО РАН
664033, Иркутск, Фаворского, 1а
finkel@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 6 сентября 2002 г.

Для области энергий рентгеновского излучения 0.1-100 кэВ, представляющей интерес в современном рентгеноспектральном анализе, предложены простые вычислительные схемы для расчета коэффициентов поглощения и рассеяния. Выражения для расчета коэффициентов поглощения и рассеяния выбраны из предложенных ранее в литературе. Параметры выражений табулированы для элементов $Z=1-92$ на основе сравнительно новых теоретических и полуэмпирических данных по полным коэффициентам ослабления и поглощения. Относительное стандартное отклонение аппроксимации полных коэффициентов ослабления для области энергий меньше 1 кэВ варьирует в интервале 1-7 % отн., для области энергий больше 1 кэВ - как правило, менее 1 % отн.

Финкельштейн Александр Львович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией рентгеновских методов анализа Института геохимии СО РАН.

Область научных интересов: рентгено-спектральный анализ горных пород и других природных сред, взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Автор более 60 публикаций.

Фарков Павел Михайлович – аспирант Института геохимии СО РАН.

Область научных интересов: рентгено-спектральный флуоресцентный анализ биологических объектов.

Автор 11 публикаций.

В спектрометрии рентгеновского излучения, а также в некоторых других смежных областях необходимы простые алгоритмы для расчета коэффициентов ослабления рентгеновского излучения в веществе. Для этих целей были предложены ряд простых вычислительных схем, аппроксимирующих зависимость от энергии и атомного номера. В табл. 1 приведены формулы, используемые в таких вычислительных схемах и часто упоминаемые в литературе по рентгеноспектральному анализу [1-10]. Оценки параметров выражений вычислительных схем опирались как на данные теоретических расчетов [11-14], так и на экспериментальные, компилятивные [15] и полуэмпирические базы данных [16, 17].

Большинство алгоритмов, представленных в таблице, были созданы для ограниченных областей энергий, например, для области энергий рентгеновского микроанализа <20 кэВ [3, 4, 5] или для рентгенофлуоресцентного анализа 1-40 кэВ [1, 2, 6-9], и не покрывают, каждый в отдельности, область энергий рентгеновского

излучения 0.1-100 кэВ, доступную в современном рентгеноспектральном анализе. В настоящее время такие легкие элементы, как углерод, кислород, фтор (область энергий 0.2-0.7 кэВ), становятся обычными для рентгеноспектрального анализа. С другой стороны, рентгеноспектральная аппаратура оснащается генераторами до 75-100 кВ, и появляется возможность определения тяжелых элементов по К-спектрам. Некоторые из перечисленных алгоритмов включают аппроксимацию зависимости от атомного номера [4, 5, 7], которая, в общем случае, увеличивает погрешность аппроксимации. В области энергий рентгеновского излучения, где преобладает фотоэффект (<10-50 кэВ), обычно используют аппроксимации полных коэффициентов ослабления, которые равны сумме коэффициентов поглощения и рассеяния. В области энергий излучения более 20 кэВ эффекты рассеяния становятся значимыми, особенно для легких элементов, и энергетическая зависимость существенно меняется и определяется фотопоглощением и комптон-эффек-

том. Для области энергии 0,1 - 1000 кэВ И.Орлик и соавторы [10] предложили аппроксимации полных коэффициентов ослабления, основанные на данных М. Бергера и Дж. Хаббела [18] для области больше 1 кэВ и Б. Хенке и соавторов [17] для области меньше 1 кэВ.

Кроме полных коэффициентов ослабления для проведения вычислений в рентгеновской спектрометрии часто необходимы расчеты коэффици-

ентов рассеяния и фотопоглощения. Для расчетов коэффициентов поглощения можно воспользоваться методикой вычитания $\mu = \mu_a + \mu_s$. Однако такая процедура неприемлема для легких элементов и энергий, для которых преобладает комптоновское рассеяние. Раздельная аппроксимация коэффициентов поглощения и когерентного и некогерентного рассеяния предложена О.С.Маренковым [8] (табл. 1) для энергий 1 - 100 кэВ.

Таблица 1

Аппроксимационные формулы для расчета коэффициентов ослабления

Автор	Аппроксимационная формула	Диапазон Z, E (кэВ) или λ (ангстрем)	Данные, лежащие в основе аппроксимации
Leroux J. [1] (1961)	$\mu = C\lambda^n$	$2 < Z < 100$ $0,17837 < \lambda < 10$	Экспериментальные данные
Tinh T. & Leroux J. [2] (1979)	$\mu = CE_q\lambda^n$ $\mu = D\lambda^n$	$2 < Z < 94$ $1 < E < 40$ $1 < Z < 16$	Преимущественно экспериментальные данные
Heinrich K.F.J. [3] (1966)	$\mu = C\lambda^n$	$3 < Z < 94$ $12 > \lambda > 0,7$	Экспериментальные данные
Heinrich K.F.J. [4] (1986)	$\mu = C(Z^4/A)(12397/E)^n \cdot (1 - \exp(-(E+b)/a))$ $C = \Sigma C_i Z_i^n$; $n = \Sigma n_i Z_i^n$; $b = \Sigma b_i Z_i^n$; $a = \Sigma a_i Z_i^n$ E в эВ Спец. формула для $EN_1 > E$	$1 < Z < 94$ $0.2 < E < 20$	Экспериментальные данные, теор. данные W.J.Veigele (1973) [11], таблич. данные B.L.Henke & E.S.Ebisu (1974) [16]
Teisen R. & Vollath D. [5] (1967)	$\mu = C\lambda^{-n} Z^i$	$3 < Z < 94$ $12 > \lambda > 0,7$ $16 > \lambda > 0,7$ для $Z < 18$	Экспериментальные данные
Montenegro E.C. e.a. [6] (1978)	$\ln(\mu) = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3$ $X = \ln(E)$	$6 < Z < 33$ λ : ClK-SnK λ : PdL-PuL	Теор. версия, таблицы E.Storm & H.Israel [12] (1970)
Poehn C., Wernisch J. e.a. [7] (1984)	$\mu = \exp(k \ln(E) + d)$ $d = a + bZ + cZ^2 + cZ^3 + eZ^4$	$11 < Z < 83$ $1 < E < 50$	Компиляция теор. и эксп. данных McMaster e.a. [15] (1969)
Маренков О.С. [8] (1982)	$\tau = \tau_0 + \tau_1 E^1 + \tau_2 E^2 + \tau_3 E^3 + \tau_4 E^4$ $\sigma_{inc} = \frac{(1 + \sigma_4 E)}{(\sigma_0 + \sigma_1 E + \sigma_2 E^2 + \sigma_3 E^3)}$ $\sigma_{coh} = (\sigma_0/E + \sigma_1 + \sigma_2 E)^{-1}$	$1 < Z < 94$ $1 < E < 150$	Теор. данные для τ - Scofield [13], (1973), для σ - Hubbell e.a. [14] (1975)
Gerward L. [9] (1986)	$\mu = C/E^3 + D/E^4 + \sigma_{KN} N_A (Z/A)$ $E > EK$; $\mu = C/E^n + \sigma_{KN} N_A (Z/A)$ $ELI < E < EK$, $EMI_1 < E < ELIII$	$2 < Z < 94$ $2 < E < 40$	McMaster e.a. [15] (1969)
Orlic I. e.a. [10] (1993)	$\ln(\mu) = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3 + \sigma_{KN} N_A / A$ $X = \ln(\lambda)$	$0,1 < E < 1000$ $1 < Z < 92$	Henke e.a. (1982) [17], Berger & Hubbell программа XCOM [18] (1987)

Обозначения формул: μ - массовый коэффициент ослабления; τ - коэффициент фотопоглощения; σ - коэффициент рассеяния (индексы inc и coh обозначают некогерентное и когерентное рассеяние); σ_{KN} - сечение Клейна-Нишины; λ, E - длина волны и энергия рентгеновского излучения; Z и A - атомный номер и масса элемента. Остальными буквами обозначены параметры формул.

В настоящей работе такой подход распространен на область энергий 0,1 - 100 кэВ. Для определения параметров аппроксимации использованы

обновленные полуэмпирические данные для энергии меньше 1 кэВ [19] и теоретические данные по полным коэффициентам ослабления для

энергии больше 1 кэВ [20]. Данные по коэффициентам рассеяния взяты из работы [14]. Современные теоретические данные довольно хорошо согласуются с экспериментальными, не содержат погрешности измерений и не имеют систематической погрешности, исключая, быть может, области вблизи краев поглощения. Оценки неопределенности коэффициентов поглощения приведены в недавнем обзоре [21]. Для области энергий 0,1-0,5 кэВ неопределенность составляет порядка 100-200 %; для области энергий 0,5-1 кэВ – 10-20 %; для области энергий 1-5 кэВ – 5 % и для области энергий 5-100 кэВ – 2 %.

Для аппроксимации энергетической зависимости коэффициентов когерентного и некогерентного рассеяния и поглощения использованы следующие выражения:

$$\sigma_{coh} = (1 + a_4 E) / (a_0 + a_1 E^1 + a_2 E^2 + a_3 E^3), \quad (1)$$

$$\sigma_{inc} = E^2 / (a_0 + a_1 E^1 + a_2 E^2 + a_3 E^3), \quad (2)$$

$$\tau = a_1 E^{-1} + a_2 E^{-2} + a_3 E^{-3} + a_4 E^{-4}. \quad (3)$$

Параметры выражения для σ_{coh} (1) из работы [8] (см. табл. 1) были уточнены с помощью процедуры Ньютона минимизации стандартного отклонения. При этом иногда достигалось уменьшение относительного стандартного отклонения в 1,5-2 раза. На рис. 1 приведен пример поведения относительной погрешности приближения ($\Delta = (\sigma_{coh} - \sigma_{coh, расч.}) / \sigma_{coh}$) для нескольких элементов.

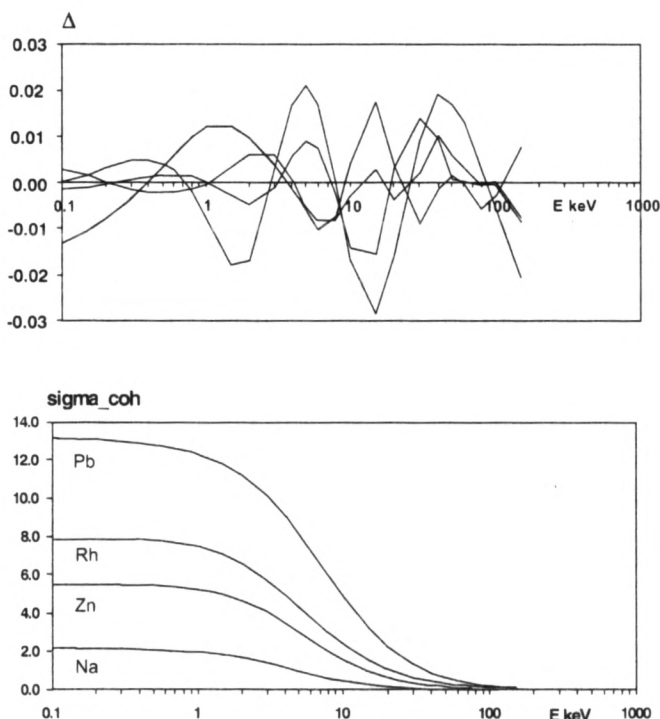


Рис. 1. Зависимость погрешности аппроксимации (Δ) и коэффициента когерентного рассеяния (σ_{coh}) от энергии рентгеновского излучения

Для сравнения на рис. 1 приведена зависимость σ_{coh} от энергии излучения. Максимальное отклонение составляет порядка 3 % отн. В области, где рассеяние максимально (<1 кэВ), отклонение уменьшается. Относительное стандартное отклонение для большинства элементов – менее 1 %.

Выражение для σ_{inc} [8] было модифицировано с учетом асимптотического поведения сечения некогерентного рассеяния при малых энергиях $\sigma_{inc} \sim E^2$. Были опробованы несколько процедур оценки параметров выражения (2): МНК, интерполяция сплайнами и интерполяция с выбором узлов из условия минимума относительного стандартного отклонения. Выбор был сделан в пользу последнего варианта. На рис. 2 приведен пример зависимости относительной погрешности интерполяции и коэффициентов некогерентного рассеяния для нескольких элементов. Область интерполяции разбита на две области 0,1-1 кэВ и 1-150 кэВ. В области менее 1 кэВ, где вкладом некогерентного рассеяния в полный коэффициент ослабления можно пренебречь, погрешность менее 10 % отн. обеспечивает выражение $s_{inc} = aE^2$. В области больше 1 кэВ максимальная погрешность аппроксимации с помощью выражения (2) составляет порядка 4 % отн. Относительное стандартное отклонение варьирует в пределах порядка 0,5-3 % для различных элементов.

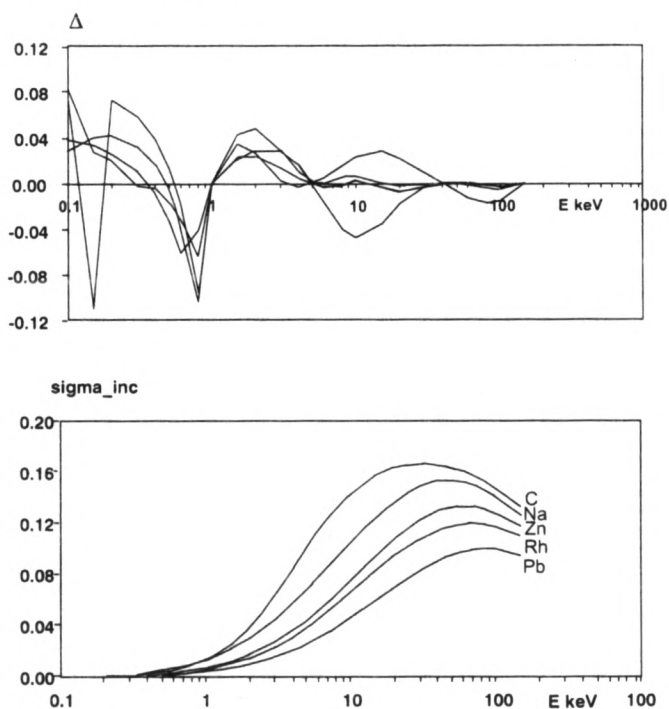


Рис. 2. Зависимость погрешности аппроксимации (Δ) и коэффициента некогерентного рассеяния (σ_{inc}) от энергии рентгеновского излучения

Параметры выражения (3) для областей непрерывности коэффициентов фотопоглощения

между краями поглощения были определены с помощью процедуры МНК с весом, который сам являлся параметром оптимизации.

$$\min - \sum \frac{(\tau(E_i) - \tau_i)^2}{W} \cdot W = \tau_i^n.$$

Оптимальное значение находится в пределах $n = 0,7 - 1$. Выбранный таким образом вес обеспечивает приблизительно равномерное распределение относительной погрешности. Пример по-

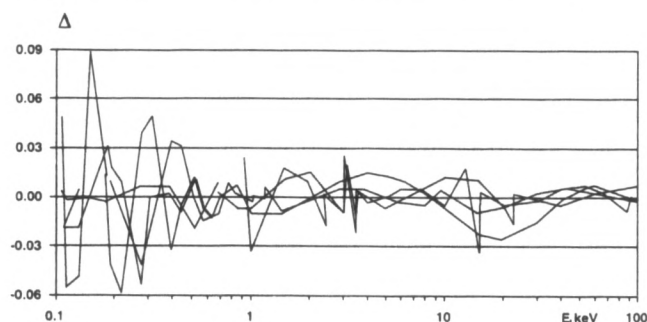
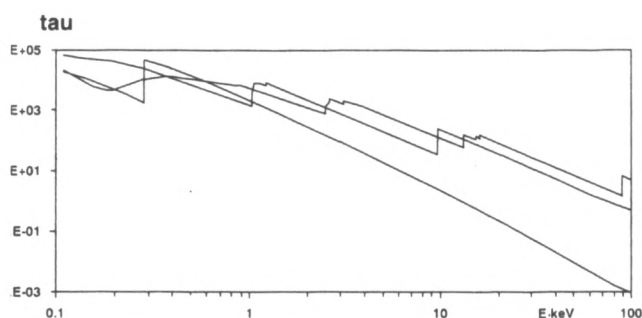


Рис.3. Зависимость погрешности аппроксимации (Δ) и коэффициента фотопоглощения (τ) от энергии рентгеновского излучения

ведения относительной погрешности аппроксимации приведен на рис.3. В области энергии 1-100 кэВ максимальная погрешность не превышает 3 % отн. В области меньше 1 кэВ отклонения могут достигать 6-9 % отн. Такое поведение погрешности согласуется с общей тенденцией увеличения неопределенности коэффициентов поглощения в области энергии менее 1 кэВ и значительно меньше неопределенности, упомянутой выше.



Коэффициенты уравнений (1)-(3) табулированы для атомных номеров 1-92. Относительное стандартное отклонение аппроксимации полных коэффициентов ослабления для области энергий меньше 1 кэВ варьирует в интервале 1-7 % отн., для области энергий больше 1 кэВ - как правило, менее 1 % отн.

В табл.2 приведены значения параметров выражения (3) для расчета коэффициентов фотопо-

глощения первых 26 элементов, включающих основные порообразующие элементы. В таблице приведены также энергии границ непрерывности между краями поглощения (E_q), оценки стандартного отклонения аппроксимации и границы применимости в области энергий больше К-края поглощения, между К и L3 краями поглощения и L3 краем и энергией 0,1 кэВ.

Таблица 2

Параметры для расчета коэффициентов фотопоглощения для энергий 0,1-100 кэВ и для атомных номеров от 1 до 26

Элемент	a_1	a_2	a_3	a_4	E_q , кэВ	Ст. откл.	Граница
1	2	3	4	5	6	7	8
^1H	0	0	6,44302E+00	5,87706E-01	0,1	0,078	>K
^2He	3,87840E-02	-2,25060E+00	5,32081E+01	2,54487E+00	0,1	0,079	>K
^3Li	1,95902E-01	-1,06437E+01	2,36910E+02	-9,18268E+00	0,1115	0,055	>K
^4Be	1,46780E-01	-1,64093E+01	6,26350E+02	-4,22256E+01	0,1115	0,054	>K
5B	2,08529E-01	-2,72789E+01	1,34807E+03	-1,46465E+02	0,188	0,031	>K
	0	-4,11361E+02	2,02613E+02	-2,68331E+00	0,1	0,002	K - 0,1
6C	2,59447E-01	-4,28130E+01	2,65862E+03	-4,45525E+02	0,2842	0,026	>K
	0	-8,66676E+02	4,25830E+02	-9,88294E+00	0,1	0,006	K - 0,1
^7N	3,27216E-01	-5,91518E+01	4,32323E+03	-9,47570E+02	0,4099	0,019	>K
	0	0	-8,01213E+02	5,15848E+02	0,1	0,009	K - 0,1
8O	3,50466E-01	-6,89857E+01	6,47318E+03	-1,76066E+03	0,5431	0,018	>K
	0	1,04063E+02	1,31364E+02	-7,65706E+00	0,1	0,025	K - 0,1
^9F	5,19482E-01	-9,35153E+01	9,03381E+03	-3,23537E+03	0,6967	0,012	>K
	-5,58318E+02	6,04370E+02	7,63719E+01	-4,49633E+00	0,1	0,009	K - 0,1
^{10}Ne	5,82740E-01	-1,14762E+02	1,30582E+04	-5,59663E+03	0,8702	0,011	>K
	-3,53995E+02	5,88977E+02	1,92735E+02	-1,27890E+01	0,1	0,014	K - 0,1

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
¹¹ Na	0	-1,09682E+02	1,73039E+04	-9,86433E+03	1,0721	0,014	>K
	-2,87636E+02	6,68999E+02	2,88345E+02	-2,26435E+01	0,1	0,018	K - 0,1
¹² Mg	3,31682E-01	-1,43011E+02	2,30618E+04	-1,41387E+04	1,305	0,008	>K
	-3,45517E+02	8,54180E+02	4,78338E+02	-4,43501E+01	0,1	0,037	K - 0,1
¹³ Al	5,79944E-01	-1,73465E+02	2,92172E+04	-2,17441E+04	1,56	0,005	>K
	-2,59434E+02	8,47553E+02	7,06003E+02	-7,13375E+01	0,10	0,028	K - 0,1
¹⁴ Si	6,83640E-01	-2,03814E+02	3,80574E+04	-3,22261E+04	1,8389	0,011	>K
	-3,19715E+02	1,22067E+03	7,69303E+02	-8,98008E+01	0,1	0,052	K - 0,1
¹⁵ P	7,77058E-01	-2,27315E+02	4,60845E+04	-4,57183E+04	2,1455	0,005	>K
	-4,69827E+02	1,71585E+03	9,08813E+02	-1,37176E+02	0,135	0,062	K - L3
	0	0	2,19969E+01	-1,31728E+00	0,1	0,000	L3 - 0,1
¹⁶ S	0	-1,64468E+02	5,62510E+04	-6,00158E+04	2,472	0,009	>K
	-3,03786E+02	1,39093E+03	1,69417E+03	-2,75638E+02	0,1625	0,035	K - L3
	0	2,56713E+02	-1,15062E+01	0	0,1	0,001	L3 - 0,1
¹⁷ Cl	0	-1,69256E+02	6,51686E+04	-7,72182E+04	2,8224	0,010	>K
	-1,73283E+02	1,12690E+03	2,26881E+03	-4,07747E+02	0,2	0,009	K - L3
	-2,10420E+02	4,05923E+02	-2,09571E+01	0	0,1	0,005	L3 - 0,1
¹⁸ Ar	0	-1,76095E+02	7,35101E+04	-9,90470E+04	3,2029	0,007	>K
	-1,57823E+02	1,10124E+03	2,84078E+03	-5,42092E+02	0,2484	0,024	K - L3
	-4,09637E+02	5,10204E+02	-2,70716E+01	0	0,1	0,021	L3 - 0,1
¹⁹ K	0	-1,96350E+02	9,29353E+04	-1,31933E+05	3,6074	0,009	>K
	-1,65811E+02	1,34879E+03	3,61438E+03	-7,78459E+02	0,2946	0,007	K - L3
	-1,12804E+02	6,08603E+02	-3,78873E+01	0	0,1	0,004	L3 - 0,1
²⁰ Ca	-2,75755E-02	-2,28985E+02	1,13051E+05	-1,83245E+05	4,0381	0,006	>K
	-1,31921E+02	1,27483E+03	4,99283E+03	-1,29942E+03	0,3462	0,006	K - L3
	-7,05213E+02	9,90970E+02	-7,05967E+01	0	0,1	0,011	L3 - 0,1
²¹ Sc	3,33183E-02	-1,76627E+02	1,22807E+05	-2,18388E+05	4,4928	0,006	>K
	-1,48270E+02	1,48465E+03	5,22181E+03	-1,34786E+03	0,3987	0,006	K - L3
	-4,35151E+02	1,02363E+03	-1,03052E+02	3,13791E+00	0,1085	0,005	L3 - 0,1
²² Ti	-2,43651E-01	-2,11233E+02	1,39578E+05	-2,70178E+05	4,9664	0,006	>K
	-1,30170E+01	6,01944E+02	7,93337E+03	-2,62413E+03	0,4538	0,015	K - L3
	-1,54909E+03	1,78365E+03	-2,24013E+02	9,55678E+00	0,1085	0,010	L3 - 0,1
²³ V	-4,15323E-01	-1,97498E+02	1,57058E+05	-3,32262E+05	5,4651	0,006	>K
	0	6,25011E+02	8,93595E+03	-3,04035E+03	0,5121	0,016	K - L3
	-1,41090E+03	1,78674E+03	-1,94292E+02	6,52339E+00	0,1085	0,006	L3 - 0,1
²⁴ Cr	-1,85846E+00	-5,93444E+01	1,80239E+05	-4,14161E+05	5,9892	0,004	>K
	0	4,07672E+02	1,19515E+04	-4,83654E+03	0,5741	0,021	K - L3
	-1,07989E+03	1,72825E+03	-1,67422E+02	5,02107E+00	0,1085	0,022	L3 - 0,1
²⁵ Mn	-9,30194E-01	-1,52201E+02	2,03708E+05	-5,05486E+05	6,539	0,004	>K
	0	5,85398E+02	1,29121E+04	-5,38959E+03	0,6387	0,010	K - L3
	-1,36133E+03	2,09739E+03	-2,33877E+02	7,31748E+00	0,1085	0,015	L3 - 0,1
²⁶ Fe	-1,24087E+00	-1,29568E+02	2,34346E+05	-6,23895E+05	7,112	0,004	>K
	0	6,21239E+02	1,52677E+04	-6,83680E+03	0,7068	0,011	K - L3
	-1,05249E+03	1,95350E+03	-1,31878E+02	0	0,1085	0,024	L3 - 0,1

Полный файл данных параметров (в формате Excel) для расчета коэффициентов поглощения и

рассеяния доступен по запросу на электронный адрес: finkel@igc.irk.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. Leroux J. Method for finding mass-absorption coefficients by empirical equations and graphs // *Advances in X-Ray Analysis*. 1961. V.5. P.153-160.
2. Thinh T.P. New basic empirical expression for computing tables of X-Ray mass attenuation coefficients / T.P.Thinh., J. Leroux // *X-Ray Spectrom.* 1979. V.9, №2. P.85-91.
3. Heinrich K.F.J. X-Ray absorption uncertainty // *The Electron Microprobe*. N.Y.: Wiley, 1966. P.296-377.
4. Heinrich K.F.J. Mass Absorption Coefficients for Electron Probe Microanalysis. // 11th International Congress on X-Ray Optics and Microanalysis. 1986. P.67-119.
5. Theisen R. Tabellen der Massenschwächungskoeffizienten von Röntgenstrahlen Verlag Stahleisen M.B.H./ R.Theisen, D.Vollath. Dusseldorf, 1967.
6. Montenegro E.C. K and L X-Ray mass attenuation coefficients for low-Z materials / E.C.Montenegro, G.B.Baptista., P.W.E.P. Duarte // *Atomic Data and Nucl. Data Tables*. 1978. V.22, №2. P.131-177.
7. Wernisch J. m/r Algorithm valid for 1 keV<E<50 keV and 11<Z<83 / J.Wernisch, C.Poehn, W.Hanke, et al. // *X-Ray Spectrom.* 1984. V.13, №4. P.180-181.
8. Маренков О.С. Таблицы и формулы рентгеноспектрального анализа: Методические рекомендации. Л.: Машиностроение, 1982. Вып.3. 101 с.
9. Gerward L. Empirical Absorption Equations for Use in X-ray spectrometric Analysis // *X-Ray Spectrom.* 1986. V.15, №1. P.29-33.
10. Orlic I. Parameterization of the total mass attenuation coefficients in energy range 0.1-1000keV / I.Orlic, K.K.Loh, C.H.Sow, et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1993. B74. 352-361.
11. Veigele W.J. Photon cross sections from 0.1 keV to 1 MeV for elements Z=1 to Z=94. // *Atomic Data Tables*. 1973. V.5, №1. P.51-111.
12. Storm E. Photon cross-section from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100 / E. Storm, H. Israel // *Nuclear Data Tables*. 1970. A7. №6. P.565-681.
13. Theoretical photoionisation cross sections from 1 to 1500 keV: Rep. UCRL-51326 // Lawrence Livermore Labor; J.H. Scofield, 1973.
14. Hubbell J.H. Atomic form factors, incoherent scattering functions and photon scattering cross sections / J.H.Hubbell, Wm.J.Veigele., E.A.Briggs, et al. // *J.Phys.Chem. Ref.Data*. 1975. V.4, №3. P.471-538.
15. Compilation of X-Ray cross-sections: Report UCRL-50174 Sec.I, Sec.II / Livermore Lawrence Radiation Laboratory, University of California; W.H. McMaster, N.K.Del-Grande, J.H. Mallett, J.H. Hubbell. 1969, 1970.
16. Henke B.L. Low energy X-ray and electron absorption within solids / B.L.Henke, E.S.Ebisu // *Adv. X-Ray Anal.* 1974. V.17. P.150-213.
17. Henke B.L. Low-energy x-ray interaction coefficients: Photoabsorption, scattering, and reflection. E=10-2000eV Z=1-94 / B.L. Henke, P. Lee, T.J.Tanaka, et al. // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1982. V.27. P.1-144.
18. XCOM: Photon Cross sections on a Personal Computer: Report NBSIR 87-3597/ M.J.Berger, J.H.Hubbell 1987.
19. Henke B.L. X-ray Interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission and Reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92 / B.L.Henke, E.M.Gullikson, J.C.Davis // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1993. V.54, №2. P.181-342.
20. Tables of Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional substances of dosimetric interest: Report NISTIR 5632 / J.H.Hubbell and S.M.Seltzer. 1995.
21. Hubbel J.H. Compilation of photon cross sections: some historical remarks and current status // *X-Ray Spectrom.* 1999. V.28, №4. P.215-223.

* * * * *

APPROXIMATION OF X-RAY ATTENUATION COEFFICIENTS IN THE ENERGY RANGE 0,1 TO 100 KEV A.L.Finkelshtein, P.M.Farkov

The calculating scheme for generating mass absorption and scattering coefficients in the photon energy range of X-ray analysis interest 0,1-100 keV is proposed. Formulae for the calculation of photoabsorption and scattering coefficients are selected from those early presented in the. Fitting parameters of formulae are tabulated for elements Z=1-92 on the base of theoretical and semi-empirical databases from literature. The relative standard deviation of the fit of mass attenuation coefficients in the energy range less than 1 keV is of the order of 1 to 7 % and in the energy range 0,1-100 keV is generally less than 1 %.